

Г.Д.ГРИЦЕНКО, канд. техн. наук, ГП “Завод им. Малышева”,
В.И. ГЛАДКИХ, Министерство транспорта и связи,
А.А. КАПУСТИН, канд. техн. наук, НАУ “ХАИ”,
Е.А. ОРЛОВ, ОАО “Изюмский тепловозоремонтный завод”,
Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, НТУ “ХПИ”

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Запропонована концепція аналізу напружено-деформованого стану елементів складних та надскладних механічних систем. Розроблено математичні моделі для числового дослідження напружено-деформованого стану методами скінченних елементів та голографічної інтерферометрії. Застосування методів досліджень проілюстровано на прикладі перфорованих пластин.

Conception of analysis of stressed deformed state of elements of complicated and extra complicated mechanical systems is offered. Mathematical models are developed for numerical research of stressed deformed state by the finite element method and method of holographic interferometry. Application of these researches methods is illustrated on the example of perforated plates.

Актуальность задачи. При формулировке актуальной задачи расчетно-экспериментального исследования элементов машиностроительных конструкций, представляющих собой сложные механические системы [1-12], с привлечением метода конечных элементов (МКЭ) и метода спекл-голографической интерферометрии (МСГИ), можно вычленил следующие основные проблемы математического характера:

- сравнение полей разной природы и происхождения;
- оценка точности численных исследований при помощи метода конечных элементов;
- модификация теоретических основ метода голографической интерферометрии с точки зрения оценки точности и взаимодействия с МКЭ;
- построение меры несоответствия результатов экспериментальных и численных исследований;
- выбор методов минимизации меры несоответствия.

В работе предлагается комплекс методов, решающих данные проблемы в связи и на примере с применением численного метода конечных элементов и экспериментального – метода голографической интерферометрии

1. Формулировка задачи анализа прочностных и жесткостных характеристик элементов сложных механических систем. Рассмотрим элементы машиностроительных конструкций как механическую систему

взаимодействующих тел, поведение которой (математическая модель) описывается в общем виде в операторной форме [2-6]

$$\bar{L}_M(u_M, P_M, f_M, t) = 0, \quad (1)$$

где \bar{L}_M – некоторый оператор, структура и параметры которого зависят от типа исследуемого явления, состава системы, граничных условий, нагрузки и условий сопряжения;

u_M – массив переменных состояния, образующих пространство решений U_M , относительно которых сформулирована задача;

P_M – массив параметров (характеристики физико-механических свойств, геометрические размеры, величины присоединенных масс, жесткости), составляющих параметрическое пространство P_M ;

f_M – массив, характеризующий действующие на систему внешние нагрузки (поверхностные, объемные сосредоточенные, тепловые нагрузки), составляющие пространство нагрузок F_M ;

t – время или иной параметр, характеризующий исследуемое явление как процесс.

В частности, для большинства случаев удобно сформулировать напряженно-деформированное состояние в перемещениях. В этом случае

$$U_M = \bigcup_s u_{M_i}^{(s)},$$

где $u_{M_i}^{(s)} = u_{M_i}^{(s)}(r_i, t)$ – массив перемещений точек элемента s исследуемой системы функций с радиус-вектором \mathbf{r} с компонентами r_i ($i = 1, 2, 3$), соответствующих моменту времени t . Соответственно

$$P_M = \bigcup_s P_M^{(s)}, F_M = \bigcup_s f_M^{(s)}.$$

Например, для некоторого элемента исследуемой системы (массивное тело) общее уравнение (1) расписывается в виде системы уравнений теории упругости (индексы $^{(s)}_M$ опущены) в области Ω , занимаемой телом [2-6]:

$$2\varepsilon_{ij} = u_{i,j} + u_{j,i}; \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl}; \quad (3)$$

$$\sigma_{ij,j} + \bar{f}_i = 0, \quad (4)$$

где $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – компоненты тензоров напряжений и деформаций, связь между которыми задается тензором упругих постоянных C_{ijkl} ;

\bar{f}_i – составляющая объемной нагрузки.

Соотношения (2)-(4) дополняются граничными условиями

$$u_i|_{S_u} = g_i(\mathbf{r}), \quad (5)$$

$$\sigma_i|_{S_\sigma} = \bar{f}_i(\mathbf{r}), \quad (6)$$

где S_u, S_σ – части поверхности тела, на которых заданы геометрические и силовые граничные условия;

g_i, \bar{f}_i – заданные вектор–функции перемещений и поверхностных нагрузок.

В случае контактного взаимодействия тел p, q с гладкими поверхностями на части поверхности S_c каждого тела добавляются условия непроникновения:

$$(u_v^p + u_v^q)|_{S_c} \leq \delta(\mathbf{r}), \quad (7)$$

где u_v – составляющая перемещения по нормали \mathbf{v} к поверхности;

δ – начальный зазор в сопряжении тел.

Как известно [2-6], исходная задача (1)–(7) приводится к вариационной задаче

$$(\bar{L}_M u_M, v_M) = (f_M, v_M), \quad \forall v_M, \quad (8)$$

где \bar{L}_M – оператор краевой задачи внутри области Ω ;

$(*, **)$ – соответствующая билинейная форма,

или вариационному неравенству

$$(\bar{L}_M u_M, v_M - u_M) \geq (f_M, v_M - u_M), \quad \forall v_M \in G, \quad (9)$$

где G – множество, задаваемое ограничениями (7).

Вариационная задача (8) или неравенство (9) приводятся к проблеме минимизации функционала $I(u_M)$ [4, 5, 13-24]:

$$I(u_M) = 1/2(\bar{L}u_M, u_M) - (f_M, u_M) \rightarrow \min. \quad (10)$$

Для случая (8) ищется безусловный минимум, а для случая (9) –

минимум на множестве G в пространстве функций u_M . Данный квадратичный функционал состоит из квадратичной $a(u_M, u_M)$ и линейной $b(u_M)$ форм. При этом квадратичная форма в (10) представляет собой потенциальную энергию деформации исследуемой системы, а линейная – работу внешних сил. Например, для пространственной задачи теории упругости билинейная форма, порождающая квадратичную составляющую (10), имеет вид:

$$a(u_M, v_M) = (Lu_M, v_M) = \int_{(\Omega)} \sigma_{ij}(u_M) \varepsilon_{ij}(v_M) d\Omega, \quad (11)$$

а линейная –

$$b(u_M) = (f_M, u_M) = \int_{(S_u)} \bar{f}_i \cdot u_{M_i} dS + \int_{(\Omega)} \bar{f}_i \cdot u_{M_i} d\Omega. \quad (12)$$

Для определения напряженно-деформированного состояния тел исследуемой системы, т.е. решения некоторой текущей задачи анализа, необходимо или решить систему уравнений (2) – (6) (или неравенств (7) для случая контактного взаимодействия), или вариационное уравнение (8) (соответственно неравенство (9)), или произвести минимизацию функционала (10).

При решении задачи определения напряженно-деформированного состояния предполагается, что она поставлена корректно (по Адамару) [25-27]. При этом кроме классических требований разрешимости, единственности и устойчивости, т.е.:

$$\forall f_M \exists u_M : L_M(u_M, p_M, f_M, t) = 0, \quad (13)$$

$$[L_M(u_M^1) = 0, L_M(u_M^2)] = 0 \Rightarrow u_1 = u_2, \quad (14)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|f_M^\varepsilon - f_M\| = 0 \Rightarrow \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \|u_\varepsilon - u\| = 0, \quad (15)$$

где $\|\ast\|$ – некоторая норма;

u_ε – решение (1) для $f_M = f_M^\varepsilon$,

предполагается еще и требование устойчивости по отношению к изменению оператора \bar{L}_M (как структурному, так и параметрическому), а также граничных условий (5) – (6) и условий контактного непроникновения (7). Последние условия распространяются и на функции g_i, \bar{f}_i, δ из (5) – (7), и, соответственно, на поверхности S_u, S_σ, S_c . Соотношения (1) – (15)

составляют математическую модель для определения напряженно-деформированного состояния элементов машиностроительных конструкций.

Оператор \bar{L}_m исследуемой задачи действует как оператор \bar{L}_m в области Ω и характеризуется типом оператора, его структурой, физико-механическими характеристиками, определяемыми свойствами материала, а также физической размерностью области Ω . На границе действуют различные граничные условия, характеризующие тип краевых условий, внешние нагрузки, условия контактного взаимодействия. Кроме того, сама область Ω имеет некоторую форму и геометрические размеры. То же относится к границе S и ее составляющим.

Все указанные данные различной природы составляют множество обобщенных параметров математической модели исследуемого элемента сложных механических систем. Естественно, что при переходе от реального объекта к его математической модели допускается некоторая погрешность. В соответствии с этим необходимо в различных случаях решать следующие типы задач:

- уточнение оператора краевой задачи (тип, структура);
- уточнение краевых условий; уточнение нагрузок (тип, величина, распределение);
- уточнение условий сопряжения;
- уточнение формы, размеров, гладкости областей Ω , S .

2. Конечно-элементное описание поведения элементов сложных механических систем. Для численного решения задачи минимизации функционала (10), в настоящее время часто применяется метод Рунца с базисными кусочно-полиномиальными функциями – метод конечных элементов [2, 4, 6]. Тогда, вводя пространство V^n (n – количество узлов сетки конечных элементов) базисных функций МКЭ [6], исходную задачу можно привести к проблеме минимизации функционала

$$I^n(q^n) = 1/2 K_{ij} q_i q_j - b_i q_i, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad (16)$$

где $K_{ij} = (L\varphi_i, \varphi_j)$ – коэффициенты матрицы жесткости конструкции K ;

φ_i – базисная функция МКЭ;

$b_i = (f_i^N, q_i)$ – элементы массива узловых нагрузок.

Условия минимальности (16) дают систему линейных алгебраических уравнений [6]

$$K \cdot q = b, \quad (17)$$

которая соответствует операторному аналогу (1)

$$\bar{L}_n(u_n, P_n, f_n, t) = 0, \quad (18)$$

где u_N, P_N, f_N – соответственно аналоги u_M, P_M, f_M в пространстве функций u_N , параметров P_N и нагрузок f_N .

Таким образом, при дискретизации исходной задачи производится переход от функционального пространства функций U_N к пространству конечной размерности V^N . Поскольку V^N является замкнутым подпространством U_M , то для решения u_N и ошибки МКЭ

$$\Delta_N = (u_M - u_N)$$

справедливы следующие утверждения [6]:

$$a(u_M - u_N, u_M - u_N) = \min_{v_N \in V^N} a(u_M - v_N, u_M - v_N); \quad (19)$$

$$a(u_M - u_N, v_N) = 0, \quad \forall v_N \in V^N; \quad (20)$$

$$a(u_N, v_N) = b(v_N) \quad \forall v_N \in V^N; \quad (21)$$

$$a(\Delta_N, \Delta_N) = a(u_M, u_M) - a(u_N, u_N); \quad (22)$$

$$a(u_N, u_N) \leq a(u_M, u_M). \quad (23)$$

Таким образом, в пространстве с энергетической нормой решение u_N является проекцией решения u_M на пространство V^N , причем энергия ошибки равна ошибке в энергии.

Для евклидовой нормы ошибки справедлива оценка [6]

$$\|\Delta_N\| \leq C_N h^\xi \|u_N\|, \quad (24)$$

где h – размер конечного элемента;

ξ – показатель, зависящий от типа задачи.

Зависимости и соотношения (9)-(24) носят качественный характер. Тем не менее, из этих зависимостей можно сделать вывод о том, что теоретическая точность МКЭ в силу эллиптичности исследуемых задач может быть оценена качественно в различных нормах (энергетическая, евклидова, чебышевская). При этом тенденция изменения нормы ошибки должна быть монотонной: начиная с некоторого момента с уменьшением размеров конечных элементов ошибка уменьшается по обратной степенной

зависимости.

Поскольку измельчение сетки конечных элементов приводит к росту требований к объему вычислительных ресурсов, то закономерно возникает вопрос об узости постановки задачи, предполагающей повышение точности конечно-элементной модели. Здесь можно сделать 2 замечания:

1. Процесс улучшения конечно-элементной модели должен быть ограничен наперед заданным значением погрешности α_i (i – номер варианта для вычисления погрешности МКЭ)

$$\alpha_i \leq \bar{\alpha}_i. \quad (25)$$

2. Процесс повышения точности конечно-элементной модели ограничивается также вычислительными ресурсами.

Последнее замечание можно трансформировать в систему ограничений

$$V_{RAM}(\alpha) \leq \bar{V}_{RAM}(\alpha); \quad V_{HD}(\alpha) \leq \bar{V}_{HD}(\alpha); \quad V_t(\alpha) \leq \bar{V}_t, \quad (26)$$

где в правых частях соотношений (26) находятся предельные объемы оперативной памяти, дискового пространства и времени решения на компьютере или системе компьютеров соответственно.

Неявно заданные ограничения (26) и явное ограничение (25) образуют условие ограничения процесса улучшения численной модели:

$$\alpha_i \leq \alpha_i^+ = \max\{\bar{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i^{RAM}, \bar{\alpha}_i^{HD}, \bar{\alpha}_i^t\}. \quad (27)$$

Здесь $\bar{\alpha}_i^{RAM}, \bar{\alpha}_i^{HD}, \bar{\alpha}_i^t$ – соответственно решения соотношений (26) в случае равенства:

$$V_{RAM}(\alpha_i) = \bar{V}_{RAM}; \quad V_{HD}(\alpha_i) = \bar{V}_{HD}; \quad V_t(\alpha_i) = \bar{V}_t. \quad (28)$$

Наиболее существенными при повышении качества конечно-элементной модели являются задачи уточнения следующих обобщенных параметров:

- тип задачи;
- тип конечных элементов;
- схема конечно-элементной разбивки;
- размеры конечных элементов;
- расположение зон сгущения-разрежения сетки конечных элементов;
- ограничения вычислительных ресурсов.

3. Применение метода голографической интерферометрии для исследования поведения сложных механических систем. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем предполагает наличие самого

объекта исследований или его физической модели, измерительной аппаратуры, регистрирующих приборов, оборудования для расшифровки полученных результатов. Все эти элементы объединены при помощи специально разработанных схем, которые реализуют тот или иной способ измерений. Голографическая интерферометрия [28-35] представляет исследователю мощный инструмент определения перемещений точек поверхности исследуемых элементов механических систем. Особенностью голографической интерферометрии является возможность проведения бесконтактных измерений как на физической модели исследуемого объекта, так и на самом объекте. При этом, как и любой другой метод экспериментальных измерений, метод голографической и спекл-интерферометрии допускает формальную запись в виде:

$$\bar{L}_E(u_E, P_E, f_E, t) = 0, \quad (29)$$

где \bar{L}_E – некоторый оператор, который можно трактовать как способ преобразования интерференций о деформации объекта в некоторый формат данных;

u_E – массив переменных состояния (в большинстве случаев – вектор перемещений точек поверхности исследуемого тела);

P_E – массив параметров P_E , включающий в себя (в соответствии с концепцией обобщенной параметризации, принятой в статье) и метод измерений, и измерительные схемы, и количественные параметры используемой аппаратуры, и методы расшифровки и обработки результатов измерений;

f_E – массив, характеризующий внешнее воздействие на исследуемый объект;

t – время.

В данной работе предлагается использование технологии записи и расшифровки спекл-интерферограмм, предложенных в работах А.А.Капустина, в частности [35]. В этом случае интерферограмма Денисюка является и спекл-фотографией объекта.

Для определения компонент перемещений, перпендикулярных плоскости голограммы, используется соотношение [28-35]

$$u_n = (\lambda N) / 2, \quad (30)$$

где N – номер полосы;

u_n – нормальная составляющая вектора перемещения \mathbf{u} ;

λ – длина волны лазера.

Для определения перемещений u_τ в плоскости спекл-фотографии используются соотношения (рис. 1):

$$u_{\tau} = \frac{\lambda a^3}{L^3}, \quad (31)$$

где a^3 – расстояние между полосами на экране;
 L^3 – расстояние до экрана.

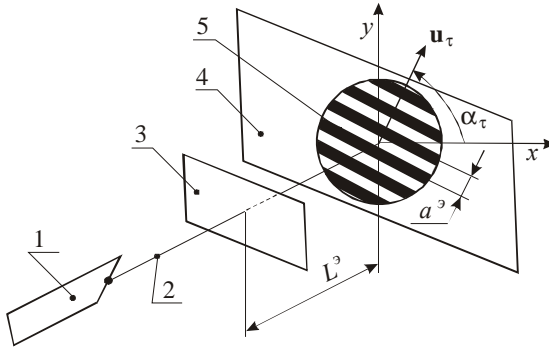


Рис.1. Схема поточечной расшифровки спекл-интерферограмм:
1 – лазер; 2 – неразведенный луч; 3 – спекл-интерферограмма;
4 – экран; 5 – картина полос

При этом вектор u_{τ} направлен по перпендикуляру к полосам, наблюдаемым на экране при освещении спекл-интерферограммы неразведенным лучом лазера (см. рис. 1).

4. Источники погрешностей метода голографической интерферометрии. Рассмотрим природу погрешностей метода голографической и спекл-интерферометрии.

Природа и источники погрешностей:

- погрешность самой модели;
- погрешность измерительной схемы;
- погрешность носителя (шум);
- погрешность расшифровки;
- погрешность дальнейшей интерполяции и обработки (вычисление перемещений в промежуточных точках, численное дифференцирование).

Влияние погрешности модели является неуправляемой величиной в ходе эксперимента. Она минимизируется при соблюдении технологии изготовления объекта или его физической модели, а также путем статистической обработки результатов множества измерений на некоторой выборке исследуемых объектов. Что касается остальных компонент погрешности, то они минимизируются путем разработки новых измерительных схем, методов расшифровки и обработки информации.

Погрешность измерительной схемы в данном случае сводится к минимуму путем использования схемы, соединяющей запись метода голографической интерферограммы и спекл-фотографии на одном носителе одновременно [28-35]. В этом случае удастся избежать погрешностей, обусловленных традиционными технологиями расшифровки [28]. Соотношения (30) и (31), в которых нормальная и тангенциальная составляющие вектора перемещений разделены по способу их получения, а также формально, позволяет исключить взаимовлияние этих компонент, что максимально увеличивает точность измерений. Тогда погрешности измерений определяются по соотношениям

$$\frac{\|\Delta u_N\|}{\|u_N\|} = \frac{\|\Delta N\|}{\|N\|}, \quad \frac{\|\Delta u_\tau\|}{\|u_\tau\|} = \frac{\|\Delta a\|}{\|a\|}. \quad (32)$$

Соответственно в данном случае относительная погрешность гораздо меньше, поскольку отсутствует влияние числа обусловленности матриц направляющих косинусов, которые сопровождают процесс расшифровки [28-34] интерферограмм.

Погрешность носителя (регистрирующей среды) уменьшается применением высококачественных фотопластин ПФГ-03, позволяющих регистрировать с высокой разрешающей способностью интерференционные полосы, что для практических приложений обеспечивает и точность фиксации, и допустимую густоту полос на голограмме.

Вклад указанных выше составляющих погрешности измерений можно уменьшить практически до долей процента. В то же время существенно возрастает значение компонент погрешностей расшифровки, интерполяции и обработки данных, поскольку предполагается автоматизированное выполнение этих операций.

5. Схема расчетно-экспериментальных исследований. Комплексная схема построения конечно-элементной модели элементов сложных механических систем и исследования их напряженно-деформированного состояния имеет многозвенный вид, представленный на рис. 2, и включает геометрическое моделирование, конечно-элементный анализ и экспериментальные исследования (в данном случае привлекаются системы Pro/ENGINEER, ANSYS и специальные модули).

Предложенный подход соединяет преимущества параметрического моделирования, универсальности и учета специфики исследуемых конструкций, специализированного программного обеспечения, а также классического метода конечных элементов и метода голографической интерферометрии. Полученные параметрические модели используются для поливариантных расчетов напряженно-деформированного состояния элементов механических систем (ЭМС) с целью определения параметров

достоверных численных моделей.

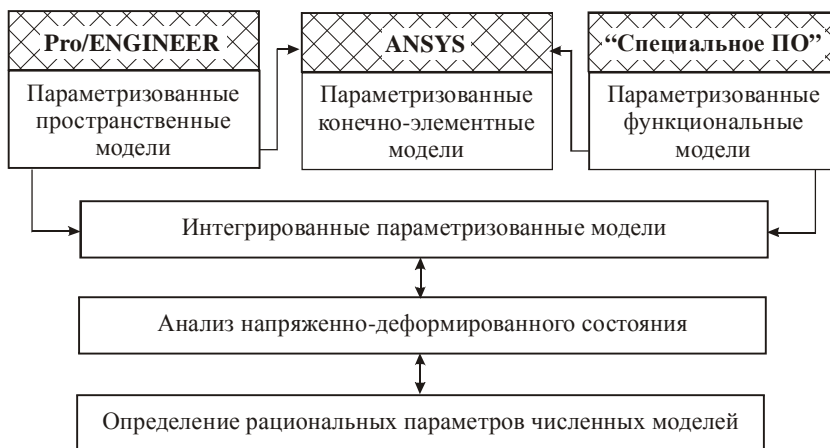


Рис. 2. Комплексная схема построения параметрических моделей для исследования напряженно-деформированного состояния ЭМС

Предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований на основе применения параметрических пространственных твердотельных и конечно-элементных моделей.

Взаимодействие отдельных модулей специализированного программно-аппаратного комплекса (СПАК) показано на рис. 3.

Как указывалось ранее, самостоятельную ценность имеют не только и не столько экспериментально проверенные результаты численных исследований, но и рационально сбалансированная достоверная численная модель объекта. Конечно-элементная модель сложного объекта может иметь также и большую коммерческую ценность.

Кроме того, предложенная методика может быть положена в основу иерархической базы данных и знаний о том или ином классе объектов, причем объектами сравнения могут быть множества баз данных (как численных, так и экспериментальных). Здесь также могут быть введены соответствующие критерии улучшения модели, причем для сравнения могут быть взяты модели, полученные независимо из различных источников и в разное время.

Окончательным результатом исследования является достоверная численная модель для определения напряженно-деформированного

состояния тех или иных объектов или классов объектов.



Рис. 3. Взаимодействие модулей созданного СПАК на базе метода конечных элементов и спекл-голографической интерферометрии

При решении поставленной задачи при помощи предложенного расчетно-экспериментального метода ее можно обратить: пусть имеется достаточно

точный инструмент исследования численных моделей, однако существует сомнение в применимости тех или иных математических моделей. То же – на любом участке цепи “математическая модель – численная модель – экспериментальная модель с измерительной аппаратурой”. В этом случае можно определить структуру и параметры той или иной модели или определить область в пространстве варьируемых параметров, в пределах которой справедливы созданные модели.

Формально в процессе исследований можно “уравнять в правах” все типы моделей, выделив группу уточняющих моделей и уточняемую модель. Кроме того, возможна и постановка “смешанной” задачи, т.е. задачи, в которой объектом уточнения является множество параметров, представляющее совокупность параметров из различных типов моделей. В этом случае вместо уточняющих и уточняемых моделей (и их параметров) в качестве основных объектов выступают соответственно подмножества параметров. Более того, состав этих множеств может изменяться за счет “миграции” параметров из группы в группу.

Предлагаемый метод изучения напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем допускает глубокую степень формализации, однако большую роль в процессе исследований играет сам исследователь (или группа исследователей). В его компетенции – определение, изменение (удаление, пополнение) множества параметров, а также границ их изменения, разрешение коллизий, а также текущий контроль за процессом. Это обусловлено:

- во-первых, невозможностью на данном этапе полной формализации предлагаемой технологии исследований;
- во-вторых, необходимостью исключения тупиковых ситуаций;
- в-третьих, очень высокой стоимостью ошибки (неоправданное усложнение плана экспериментальных исследований может повлечь такой рост общей стоимости всего комплекса исследований группы или класса конструкций, что он превысит стоимость аналогичных работ по традиционному способу).

Предложенные схемы расчетно-экспериментальных исследований позволяют оперативно проводить *серии* исследований групп конструкций, причем наиболее трудоемкая часть, а именно экспериментальная, проводится в минимально возможном объеме.

Используя преимущества INTERNET-технологий, исследования с применением предложенного расчетно-экспериментального метода можно:

- во-первых, распараллелить (т.е. одновременно выполнять отдельные этапы и подэтапы силами различных исследователей и исследовательских групп);
- во-вторых, разнести географически и хронологически.

При организации сервера баз данных возможна также определенная организация хранения результатов исследований, позволяющая создавать банки данных по тем или иным группам конструкций. Придав таким базам данных свойства открытости и доступности, на определенной стадии их развития можно создавать “верификационные эталоны” для различных видов механических систем.

Это в свою очередь позволяет создавать экспертные системы, само существование которых избавило бы от необходимости проводить большую часть экспериментальных исследований, поскольку перед предстоящим циклом исследований всегда была бы возможность обратиться к соответствующей (и все время пополняемой) базе знаний. Чем полнее и совершеннее эта база, тем больше вероятность получить необходимые рекомендации для построения достоверной численной модели исследуемой механической системы.

Естественно, что при проведении расчетно-экспериментальных исследований в предложенной постановке одним из требований является некоторая степень *избыточности* экспериментальных данных, которая позволяет повысить степень точности и полноты создаваемой численной модели.

Таким образом, предложенный подход позволяет устранить существующие недостатки традиционной технологии расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем, а именно формализовать процесс сравнения, автоматизировать процесс улучшения численной модели и повысить оперативность всего цикла исследований.

6. Состав программного и аппаратного комплексов. При оснащении создаваемого программно-аппаратного комплекса (ПАК) программным обеспечением учитывались следующие факторы:

- максимальные функциональные возможности программного обеспечения;
- беспрепятственность обмена данными;
- соответствие потребностей программного обеспечения возможностям аппаратного обеспечения;
- возможность использования лицензионного программного обеспечения в научных исследованиях и учебном процессе.

В связи с этим в состав ПО были включены следующие программные комплексы, приведенные на рис. 4.

Для реализации всех возможностей разработанного и привлекаемого программного обеспечения при формировании аппаратного обеспечения созданного программно-аппаратного комплекса предъявлялись следующие требования:

- максимальное использование возможностей, представляемых ПО и операционными системами, на 32-разрядной платформе;

- сбалансированность отдельных звеньев аппаратного обеспечения и каналов передачи информации;
- унификация платформ и оборудования отдельных звеньев аппаратного обеспечения;
- сравнительно низкая стоимость.

Комплексу данных требований отвечает аппаратное обеспечение, приведенное на рис. 5.

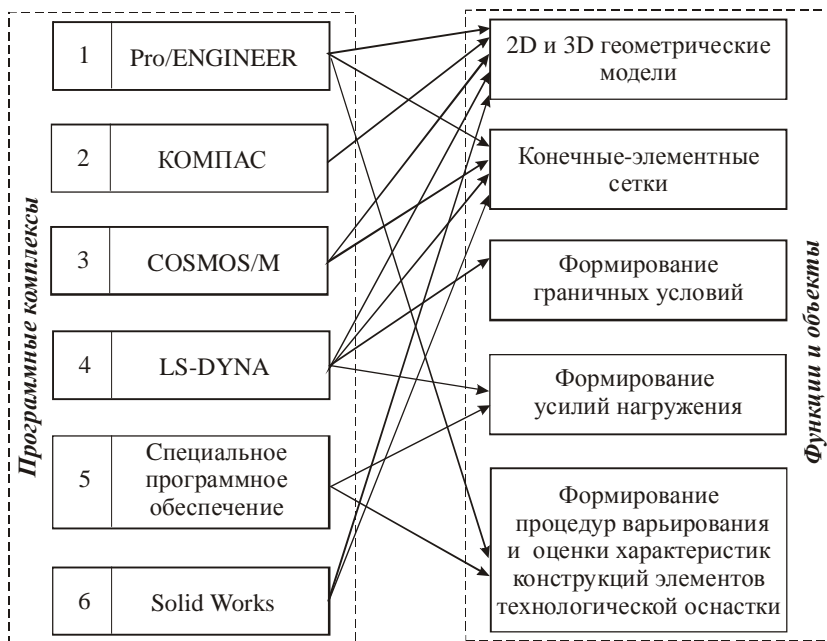


Рис. 4. Программные комплексы, их функции и объекты оперирования в создаваемом программно-аппаратном комплексе

Созданный программно-аппаратный комплекс обеспечивает расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем практически любой степени сложности в короткие сроки. Так, объем оперативной памяти в 4 GB (вычислитель на базе процессоров XEON, рис.6) позволяет размещать в оперативной памяти задачи, по объему соответствующие граничным возможностям операционной системы Windows и системы ANSYS для 32-разрядных платформ. При этом RAID-массивы накопителей на жестких магнитных дисках объемом 1,1 TB позволяют размещать сверхгроздкие базы данных и оперативно их обрабатывать.

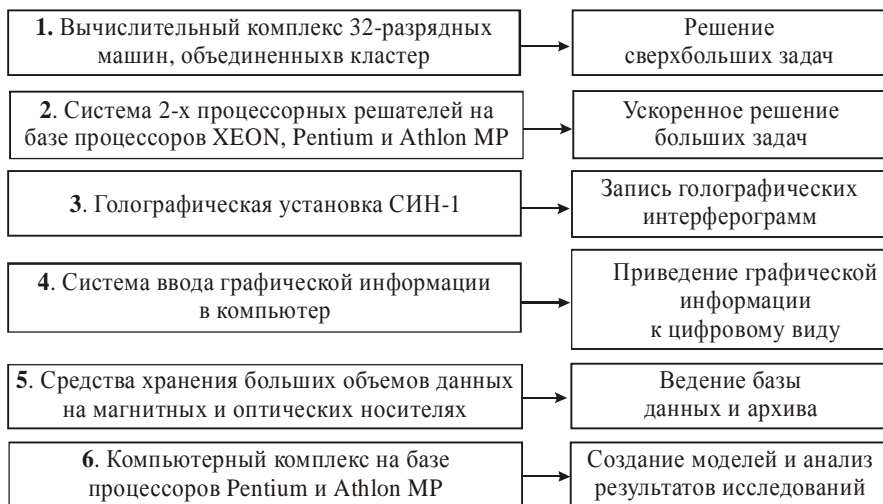


Рис. 5. Состав и функции элементов аппаратного обеспечения программно-аппаратного комплекса

Голографическая установка СИН-1 (см. рис. 6) дает возможность фиксации спекл-интерферограмм проектируемых элементов сложных механических систем, причем точность определения перемещений – до 0,1 мкм.

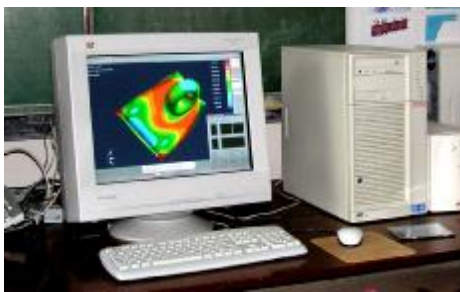
Для ввода графической информации в компьютер используется комплекс на основе Web-камеры, цифровых фотокамер HP и Olympus с фиксирующими матрицами 1 и 4 мегапикселей (см. рис. 6). Передача и хранение информации осуществляется при помощи перезаписываемых и записываемых оптических носителей информации емкостью 0,7-3,7 GB, а также накопителей на жестких магнитных дисках емкостью 1,1 TB.

Разделение задачи численных исследований на препроцессинг, решение систем уравнений и постпроцессинг позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы программно-аппаратного комплекса, привлекая на первый и третий этапы этого процесса компьютеры с более скромными требованиями к их техническим характеристикам и сосредотачивая всю вычислительную мощь, требуемую на втором этапе, на кластерной системе и 2-х-процессорных рабочих станциях.

Особенностью созданного программно-аппаратного комплекса является блочно-модульная структура аппаратного обеспечения и программного обеспечения, способность к развитию и модернизации, универсальность.



Элементы кластера
компьютеры
Athlon-2500+, O3V – 1,5 GB



2-х процессорный решатель на базе
процессоров *Pentium IV XEON 2,8GHz*



Голографическая установка СИН-1



Система ввода графической информации в
компьютер на базе цифровых камер



Лазер гелий-неоновый



Элементы оптической схемы

Рис. 6. Элементы созданного
программно-аппаратного комплекса

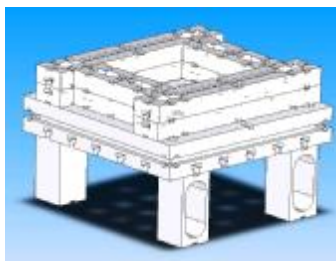


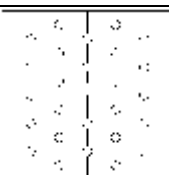
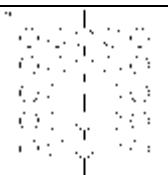


Рис. 7. Экспериментальное устройство “Краб”

7. Решение модельных задач. С использованием разработанного программно-аппаратного комплекса было проведено решение ряда тестовых задач. В частности, для апробации функционирования экспериментальной части ПАК было спроектировано, изготовлено и смонтировано устройство под условным названием “Краб” (рис. 7). Данное устройство позволяет проводить крепление и нагружение сплошных и перфорированных пластин, геометрия которых может быть достаточно произвольной. В частности, были спроектированы, изготовлены и исследованы сплошные и перфорированные пластины для имитации поведения базовых плит с системой отверстий и других объектов с особенностями геометрии.

Таблица 1

Схема сплошных и перфорированных тест-пластин

Диаметр отверстий	Схема расположения отверстий	Диаметр отверстий	Схема расположения отверстий
0,005 м		0,01 м	
0,01 м		0,02 м	

Параллельно с экспериментом проводился численный анализ напряженно-деформированного состояния тест-пластин (толщины 2 мм и 4 мм, материал – Сталь 20Х, размеры по контуру закрепления – 0,18 x 0,18 м) (табл. 1), их конечно-элементные модели приведены на рис. 8.

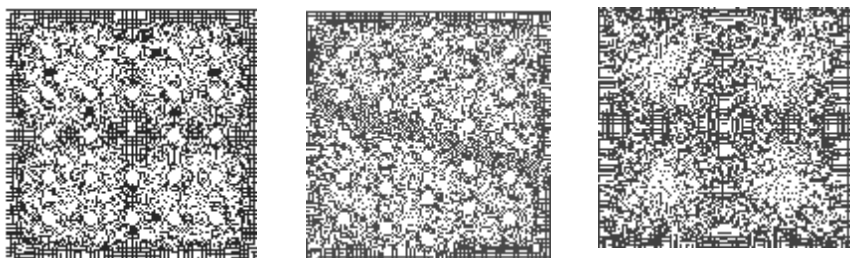


Рис. 8. Конечно-элементные модели тест-пластин

На рис. 9 приведены некоторые голографические интерферограммы, характеризующие деформированное состояние пластин при действии центрально приложенной внешней силы (имитировалось при помощи силового винта приспособления “Краб”).

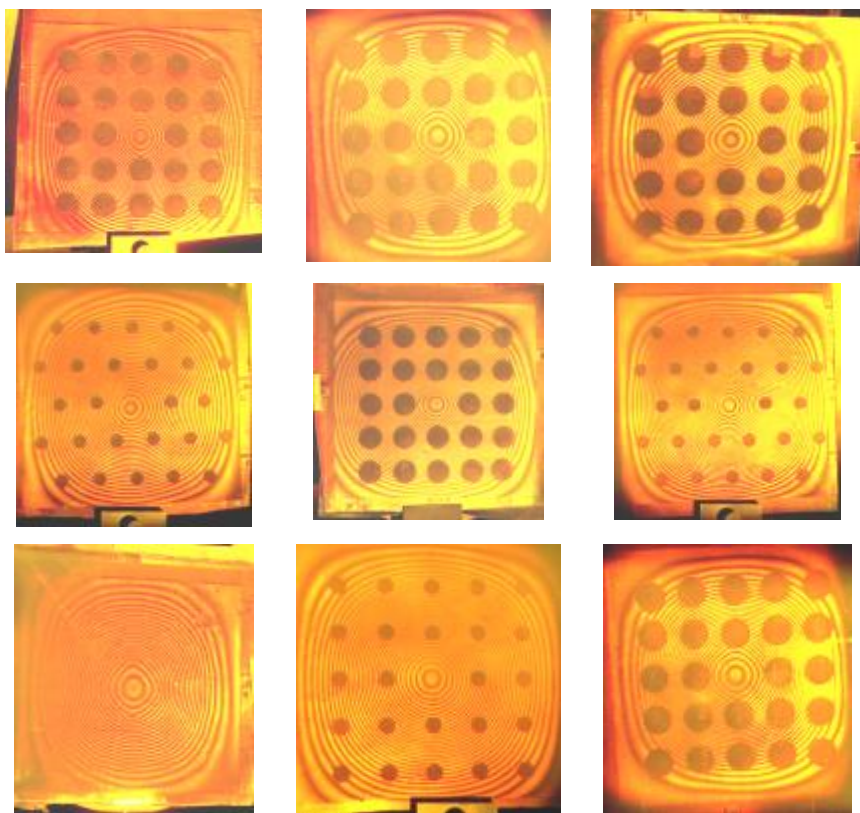


Рис. 9. Голографические интерферограммы тест-пластин

На рис. 10 приведены распределения перемещений в пластине, полученное при расшифровке картины интерференционных полос, а на рис. 11 – результаты количественного сравнения данных, полученных численно и экспериментально. В табл. 2 приведены распределения перемещений в пластине, полученные на конечно-элементной модели с различными размерами конечного элемента.

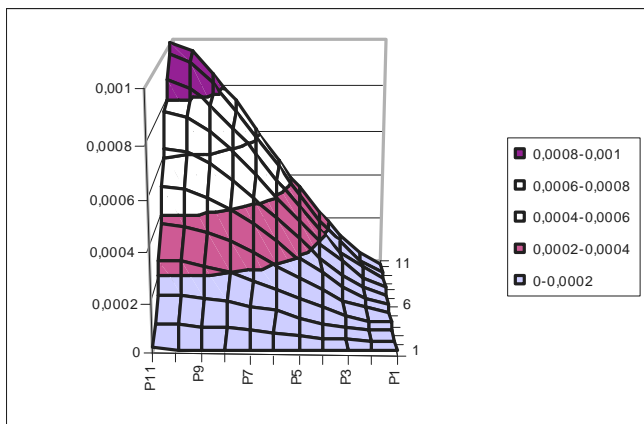


Рис. 10. Распределение перемещений в пластине, полученное при расшифровке картины интерференционных полос

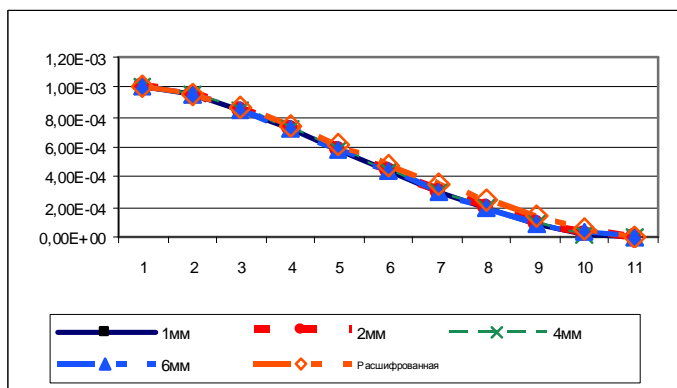
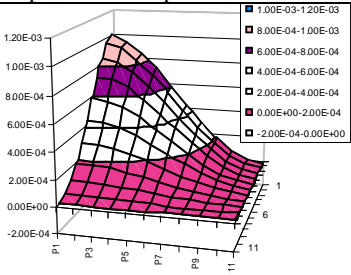
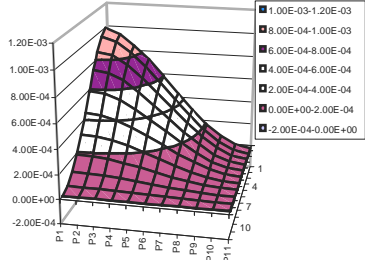
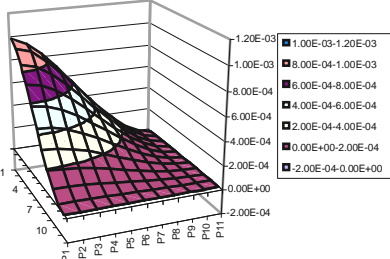
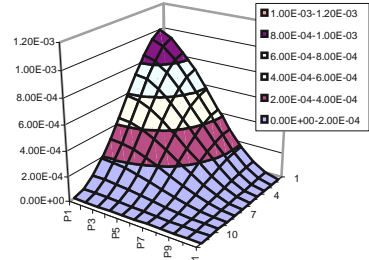


Рис. 11. Результаты численного сравнения экспериментальных и численных данных анализа напряженно-деформированного состояния тест-пластин (одна четверть пластины)

Таблица 2

Распределение перемещений в пластине, полученное на конечно-элементной модели при варьировании размера конечного элемента

Размер КЭ	Распределение перемещений в пластине
1мм	
2мм	
4 мм	
6 мм	

Видно, что при уменьшении среднего размера конечного элемента конечно-элементные модели повышается точность результатов. Однако это приводит к значительному росту требуемых для расчетов вычислительных ресурсов.

Таким образом, исходя из конкретных условий и требований, возникающих на практике, можно путем варьирования конечно-элементной модели обеспечивать необходимую точность численных моделей элементов сложных механических систем.

Наблюдаемый в ходе расчетно-экспериментальных исследований эффект неустраняемой ошибки связан с погрешностями записи и расшифровки спекл-интерферограмм. В связи с этим для определения влияния собственно эффекта сгущения конечно-элементной сетки на точность вычисления компонент напряженно-деформированного состояния был проведен численный эксперимент. Объект исследований: прямоугольная пластина со сторонами $a \times b$ (рис. 12). Условия закрепления: свободное опирание пластины по краям (шарнирное закрепление). Условия нагружения: распределенное по пластине постоянное давление. Необходимо найти: аналитическое и численное решения с помощью МКЭ. Контролируемые параметры: деформации; напряжения; полная энергия пластины; погрешности указанных величин; сходимость решения; ресурсы, затрачиваемые компьютером, при вычислении НДС с заданной точностью.

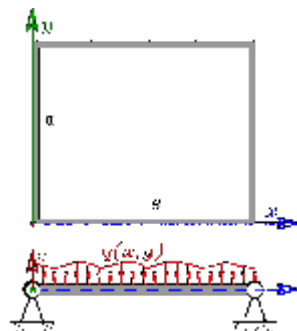


Рис. 12. Тест-пластина для численного эксперимента

Без снижения общности для конкретных вычислений были выбраны следующие параметры: геометрические параметры: $a = 1$ м – длина пластины; $b = 1$ м – ширина пластины; $h = -0,1$ м – толщина пластины; физические параметры: $E = 2.1E+11$ – модуль Юнга (модуль упругости материала); $\nu = 0,28$ – коэффициент Пуассона; параметры нагружения: $q = 10^4$ Н/м² – величина плотности распределения давления.

Точное решение для пластины получено в виде тригонометрического ряда с его программированием в программном пакете Maple. При нахождении численного решения с помощью МКЭ было принято решение воспользоваться возможностями, предоставляемыми CAE пакетом COSMOS/M. Кроме того, был проведен проверочный расчет в программе ANSYS. Проведенные исследования продемонстрировали высокую точность решения поставленной задачи с применением МКЭ, практически совпадающего с аналитическим. Это дает основание использовать численные

результаты с густой конечно-элементной моделью в качестве точных (эталонных) при верификации результатов экспериментального исследования некоторых объектов.

8. Заключение. В работе описана концепция и математическое обеспечение расчетно-экспериментальной технологии исследования напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем. Подход реализован в виде алгоритмического, программного обеспечения и специализированного программно-аппаратного комплекса. Проведенный комплекс расчетных и экспериментальных исследований подтвердил достоверность и точность работы отдельных модулей программно-аппаратного комплекса и позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенный в работе подход к решению задачи синтеза численных моделей элементов сложных механических систем реализован в виде *сбалансированного* по составу, производительности, емкости аппаратного и программного обеспечения программно-аппаратного комплекса.

2. Подтверждена работоспособность и эффективность предложенного комплекса методов, моделей, подходов к исследованию элементов сложных механических систем, сочетающих математическое, численное и экспериментальное моделирование.

3. Разработанный специализированный программно-аппаратный комплекс дает возможность в автоматизированном режиме производить построение пространственных параметрических моделей и конечно-элементных сеток элементов исследуемых объектов.

4. Тестовые расчеты подтвердили высокую эффективность и точность разработанного программно-аппаратного комплекса.

5. Разработанный программно-аппаратный комплекс построен на базе соединения возможностей современных эффективных методов, технологий аппаратных средств и программных комплексов, что в совокупности создает качественно новую среду автоматизации расчетно-экспериментального исследования элементов сложных механических систем.

Таким образом, создан реальный мощный инструмент решения любых задач анализа и синтеза элементов сложных механических систем с обеспечением высокой точности и достоверности результатов.

Задачами дальнейших исследований является разработка на основе предложенных подходов специализированных систем автоматизированного исследования и проектирования различных объектов.

Список литературы. 1. *Дитрих Я.* Проектирование и конструирование: Системный подход. – М.: Мир, 1981. – 456 с. 2. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 3. *Лурье А.И.* Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. 4. *Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с. 5. *Кравчук А.С.* Постановка задачи в контакте нескольких деформируемых тел как задачи нелинейного программирования // Прикл. мат. и мех. – 1978. – Т.42. – Вып.3. – С.466–474. 6. *Стренг Э., Фикс Дж.* Теория метода конечных